

# 減速度フィードバックの機能追加による ブレーキ距離精度の向上

中澤 伸一\*

Accuracy Improvement of Braking Distance by Using Deceleration Feedback Function Applying to Brake System

Shin-ichi NAKAZAWA

The brake control systems used in current railways are generally open-loop structures. The braking performance tends to be affected by some disturbances, such as wheel slides, characteristics of friction components included in brake equipment. In order to stabilize automatically the braking performance, we propose a new closed-loop system which can make the train deceleration follow the target value changing with the braking distance. We carried out running tests using the rolling stock equipped with the proposed method. The results of the test showed that the proposed method sufficiently contributes to the reduction of the increase of braking distance in case of temporary brake degradation.

キーワード：ブレーキシステム，減速度制御，定位置停止制御

## 1. はじめに

ブレーキ指令（階段状のブレーキノッチ）を入力，動作の結果として得られる列車の速度変化（減速度）を出力と考えると，現状の鉄道車両のブレーキシステムは，出力に応じて入力を自動的に変化させるような機能をもたない「開ループ制御」と呼ばれる構造にあたる。

一方で，実車では，雨天時などに制輪子の摩擦係数が低下したり，車輪がレール上をすべる（滑走）などにより，同じブレーキノッチを選択していても列車の減速度が変動することがある。このとき，ブレーキシステムではなく，運転士の操作や，自動列車運転（ATO：Automatic Train Operation），定位置停止制御（TASC：Train Automatic Stopping Control device）などの機能がブレーキノッチを再選択することでその変動を補おうとする。

これに対し著者らは，ブレーキシステムに列車の減速度をフィードバックして「閉ループ制御」を構成し，ブレーキ性能の安定化を図る「減速度制御」を提案してきた<sup>1) 2)</sup>。この手法は，ブレーキノッチごとに規定される減速度（設定減速度とする）を目標値として，列車の減速度をこれに追従させる「目標値追従制御」であり，従来の開ループ制御にはない機能によって列車の減速度を設定減速度に忠実に追従させることで，結果的にブレーキ距離の精度が向上した。

本研究では，この減速度制御をもとに，ブレーキ中における自車の走行距離に応じて追従制御の目標値を逐次更新する構造に拡張した手法を「距離基準減速度制御」

として新たに提案し，鉄道総研の所内試験線における実車走行試験によってその効果を示す。

## 2. 研究の背景

### 2.1 鉄道車両のブレーキシステム

現状の一般的な鉄道車両のブレーキシステムの構造の例を図1に示す。ブレーキシステムにとって，運転士による手動操作でも，ATOなどによる自動制御動作でも，受信したブレーキノッチに従って既定の動作をする点では変わりがない。

ブレーキノッチは一般的に7～8段階（ATOやTASCなどの自動制御ではさらに細分化した段数で与えられる例が多い<sup>3)</sup>）で構成され，ブレーキノッチごとに設定減速度が規定されている。そして，車体を支持する空気ばねの圧力からそのときの車両重量を把握して設定減速度を満たすための必要ブレーキ力を算出し，電気ブレーキ，空気ブレーキの双方を動作させる。この結果として発生する列車の速度変化，すなわち減速度が設定減速度を満たしているかを判定する機能はブレーキシステム自身にはなく，運転士やATOなどが減速状態を判断・判定し，必要に応じてブレーキノッチを再び選択する流れとなる。このように，現状のブレーキシステムの構造は，ブレーキノッチを入力，その結果として得られる減速度を出力とする「開ループ制御」である。

そのため，車両重量の変動を空気ばね圧力に基づいて補償する応荷重機能はあるものの，ブレーキ力の変動や車輪滑走，車両とは無関係な走行線路の勾配変化といったその他の変動要素の影響は自動的に補償されない。

\* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

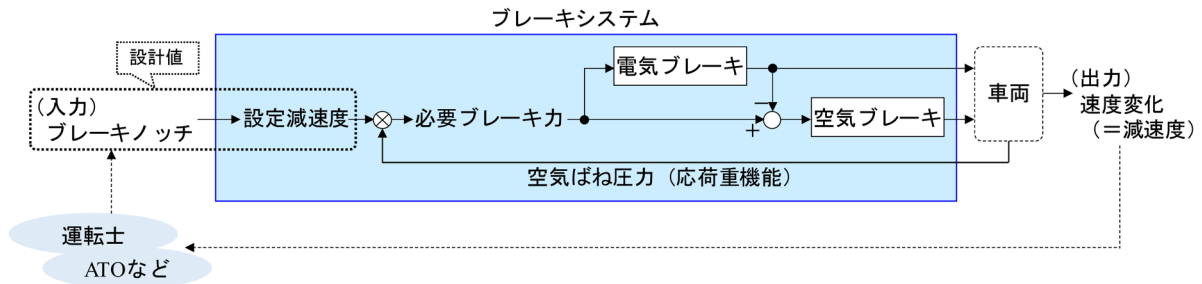


図1 一般的なブレーキシステムの構造の例

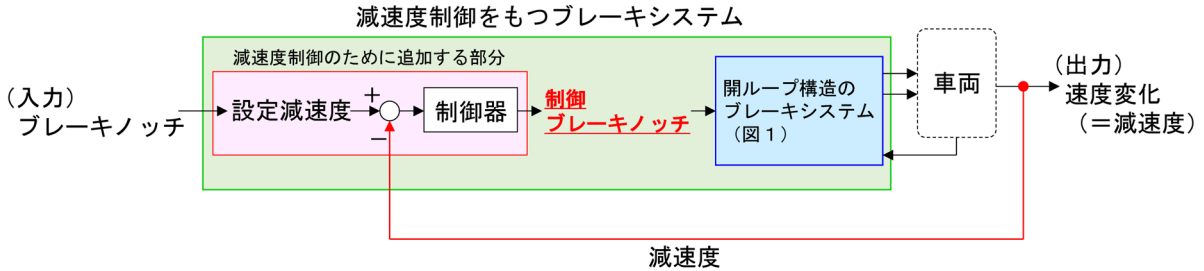


図2 減速度制御<sup>2)</sup>を追加したブレーキシステムの構造

2.2 減速度フィードバックによる目標値追従制御

ブレーキシステムとして、入力（ブレーキノッチ）に対応した出力（減速度）を常に得ることを目的に、著者らはこれまでに、車両から減速度をフィードバックする閉ループ構造の制御系を「減速度制御<sup>2)</sup>」（図2）として提案してきた（なお、実装上では車両から直接フィードバックできるのは速度で、演算により求めた減速度を制御に適用する）。

減速度制御では、運転台で選択したブレーキノッチから定まる設定減速度を目標値とし、フィードバックした減速度（実減速度とする）との誤差に基づき、制御器が新たに「制御ブレーキノッチ」を決定する。そして、図1に示した従来の開ループ構造のブレーキシシステムをそのまま利用し、ブレーキノッチを制御ブレーキノッチに

読み替えて与える。このように実減速度を設定減速度に追従させることにより、結果的にブレーキ距離を安定化することができた<sup>2)</sup>。本報では、このとき適用した減速度制御を「従来型減速度制御」とする。

しかし、ブレーキ中にブレーキ力が急激に低下するような場合には、従来型減速度制御ではブレーキ距離の延伸を防ぐことが難しい。たとえば図3に示すように、ブレーキ力が低下（すなわち減速度が低下）した場合、制御によって実減速度が再び目標値に追従・整定しても、減速度の2階積分であるブレーキ距離は、減速度が一時的に低下した影響で延伸する。この延伸分を補償するためには、開ループ制御と同様にブレーキノッチを再選択する必要がある。

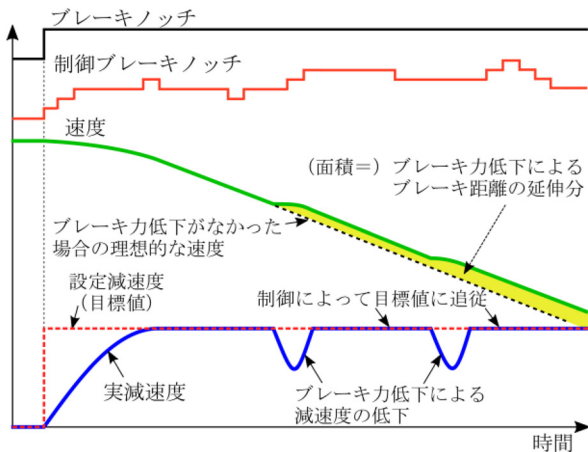


図3 従来型減速度制御を適用時にブレーキ距離が延伸する状況の例

3. 距離基準減速度制御

本研究では、ブレーキ中に減速度が低下してもブレーキ距離を延伸させないシステムの構築を目的に、これまでの減速度制御を改良し、ブレーキ距離に応じて減速度の目標値を逐次・自動的に更新して実減速度をこれに追従させる「距離基準減速度制御」を新たに提案する。

3.1 距離基準目標減速度

減速度と速度および距離の間は、一般的に時間に関する微分・積分関係にあり、一定の減速度  $\beta_N$ (km/h/s) で速度  $v_0$ (km/h) から  $v_f$ (km/h) まで減速した間の走行距離（ブレーキ距離） $S_N$ (m) には式(1)が成立する。

$$S_N = \frac{v_0^2 - v_f^2}{7.2\beta_N} + \frac{v_0}{3.6} \cdot t_0 \tag{1}$$

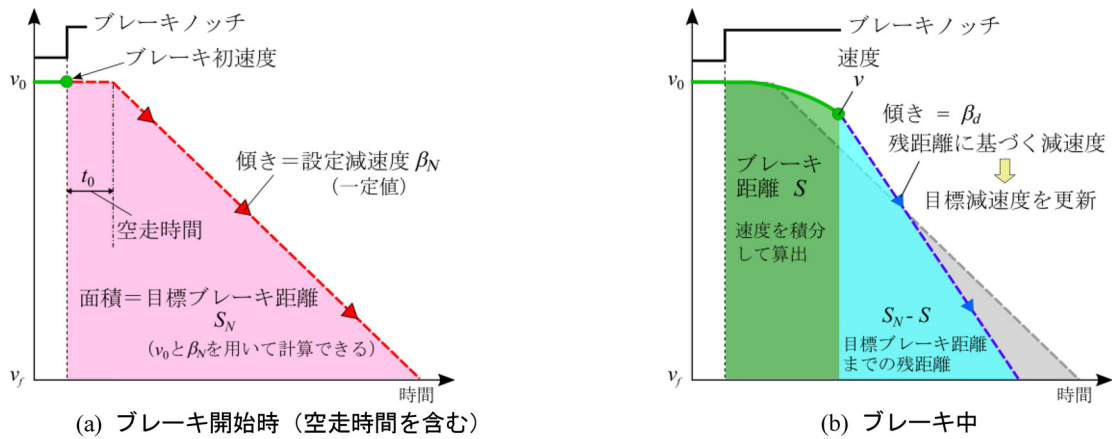


図4 距離基準目標減速度の算出過程

停止までを考える場合には  $v_f=0$  とする。また、右辺第2項は、ブレーキ開始直後など過渡応答を無視できない場合に加算する空走距離(空走時間  $t_0$ (s)間の走行距離)である。

この「一定の減速度」に設定減速度を適用すれば、 $S_N$ は、ブレーキ開始から速度  $v_f$  までのブレーキ距離の目標値(目標ブレーキ距離とする)とみなすことができる(図4(a))。

さらに、ブレーキ中は常にサンプリング時間  $\Delta t$  ごとに速度  $v$  を積算して実測のブレーキ距離を算出する(式(2))。

$$S = \int v dt (= \sum (v \cdot \Delta t)) \quad (2)$$

そして、ブレーキ距離  $S$ 、目標ブレーキ距離  $S_N$  とそのときの速度  $v$  から、式(1)の右辺第1項をもとにした式(3)を用いて、距離基準目標減速度  $\beta_d$ (km/h/s)を逐次算出する(図4(b))。

$$\beta_d = \frac{v^2 - v_f^2}{7.2(S_N - S)} \quad (3)$$

式(3)の分母に含まれる  $S_N - S$  は、目標ブレーキ距離までの残距離である。したがって、 $\beta_d$  は「残距離の間に目標とする速度 ( $v_f$ ) まで減速するために必要となる減速度」を意味する。このように逐次算出される距離基準目

標減速度  $\beta_d$  を、図2において設定減速度で与えていた目標値と置き換えた制御系を「距離基準減速度制御」とする。そのブロック線図を図5に示す。

なお、ここではブレーキ初速度  $v_0$  に応じて目標ブレーキ距離を求め、距離基準目標減速度を算出する過程を示しているが、ブレーキ開始点を固定して目標ブレーキ距離も固定値とすれば、定位置停止制御として動作させることができる。

### 3.2 制御器の構造

距離基準減速度制御における制御器は、距離基準目標減速度と実測速度との誤差を入力として、制御ブレーキノッチを出力とする。その構造は、先行の減速度制御<sup>2)</sup>と同じPI制御を基本とし、むだ時間をもつ制御対象に有効とされるスミス補償法を組み合わせ適用した(図6)。スミス補償法は、制御器内に制御対象のモデルを与え、その出力を予測してむだ時間の影響を相殺することで、PI制御のゲイン調整をむだ時間を考慮しないで行える手法である。ここでの制御対象とは、制御ブレーキノッチを受け、動作の結果として実減速度をフィードバックする部分にあたり(図5の青点線枠で囲った部分)、本研究ではこれを単純な1次遅れ系としている。

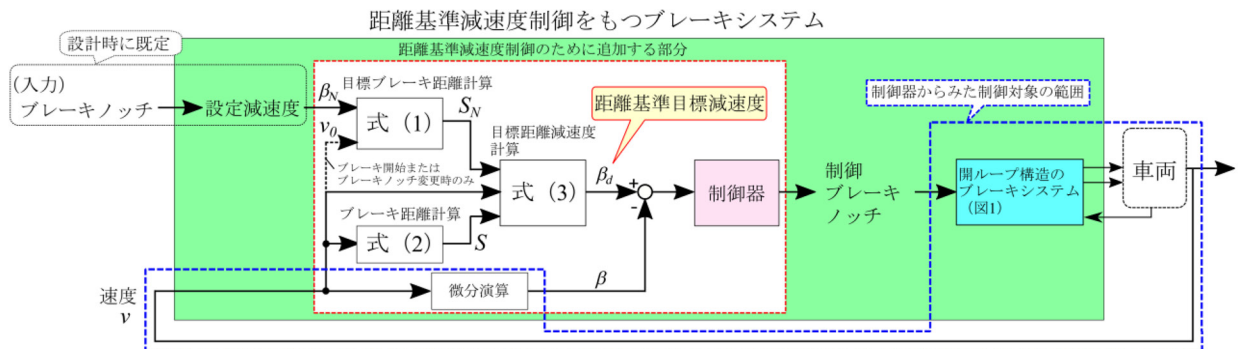


図5 距離基準減速度制御のブロック線図

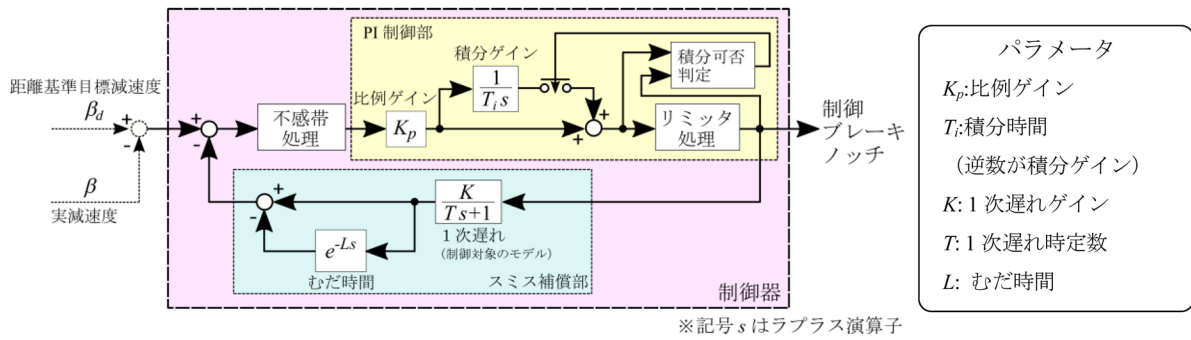


図6 減速度制御の制御器の内部構造

PI制御部は、前回サンプリングの出力からの変化分を算出して加算していく「速度形」として実装した。スミス補償部では、制御ブレーキノッチを入力として、1次遅れ系のモデルの出力を減速度の予測値として一定の時間記憶しておき、むだ時間長さ分だけ過去にさかのぼって参照する構造とした。

そして、制御対象のハードウェア上の制約および保護のため、過大な出力や急峻な動作を要求しないように、PI制御部への入力に不感帯を設けるとともに、制御ブレーキノッチにリミッタを設けた。

さらに、制御器の最終出力である制御ブレーキノッチは、常用最大ブレーキの設定減速度を基準に、一般的な手動操作と同じ段数(7段階)のほか、より細分化した段数にも設定できる構造とした。

#### 4. 実車走行試験

鉄道総研の所内試験線において、距離基準減速度制御を適用した所内試験電車によるブレーキ試験を実施し、ブレーキ距離の精度を比較した。

#### 4.1 車両条件

鉄道総研の所内試験電車(付随車(Tc車)と動力車(Mc車)の2両編成。以下「試験列車」とする)を使用した。試験列車の構成を図7に示す。

車上に「距離基準減速度制御装置」を搭載し、入力としてTc車の速度発電機の出力を車輪周速度としてフィードバックした。制御装置からの出力である制御ブレーキノッチは、空気圧制御弁への指令信号(電流値)に変換して「ブレーキシリンダ(BC)圧力発生装置」に与える構造とした。このBC圧力発生装置は、運転台の操作で動作する通常のブレーキシステムとは独立にBC圧力を制御できる機能として試験列車に搭載されている装置である。Tc車とMc車で共通の制御ブレーキノッチに対して、車両重量に応じて車両ごとにBC圧力を変える「応荷重機能」は、信号変換機能の一部としてソフトウェア上で構成した。

また、Tc車の床下に光電センサを設置し、軌道側に固定した反射板上の通過をセンサが検知したときにブレーキを開始する構成として、ブレーキ開始点を固定した。なお、このブレーキ開始点までは運転士の手動操作で走行するので、ブレーキ初速度は試験ごとに異なる。

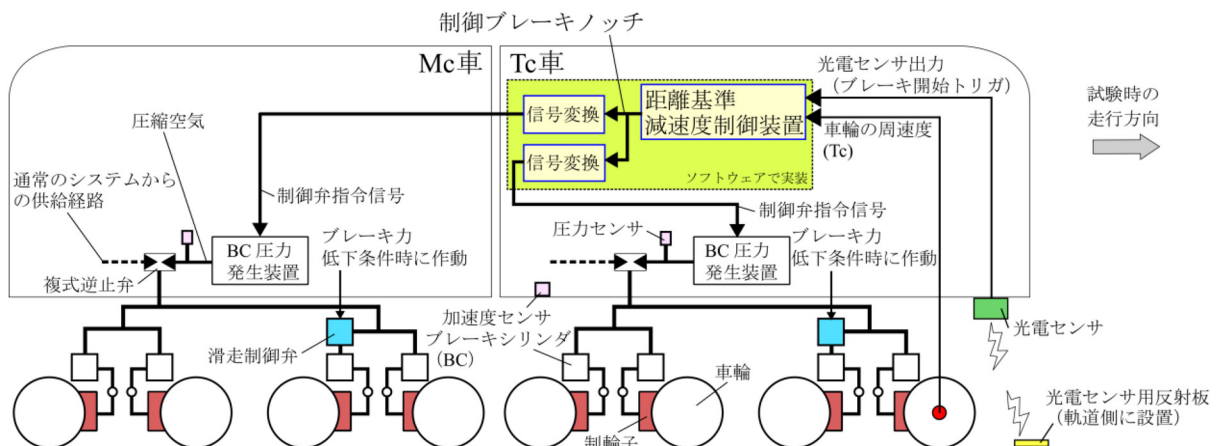


図7 試験列車の制御構成

#### 4.2 制御条件

本試験では、距離基準減速度制御（以下「提案型」とする）のほか、比較のために従来型減速度制御（以下「従来型」とする）と開ループ制御（BC圧力を一定とする制御。以下「開ループ型」とする）を適用してブレーキ試験を実施した。また、提案型では、初速度によらず目標ブレーキ距離を固定値として定位置停止制御（TASC）を模擬した条件での試験も実施した。

提案型と従来型では、制御器の内部構造と設定値（比例および積分ゲイン、スミス補償部の1次遅れモデルのゲインと時定数、むだ時間長さ）は共通である。制御ブレーキノッチの設定も共通とし、試験列車の常用最大ブレーキの設定減速度（4.32km/h/s）を21段階に等分した。

また、ブレーキ開始直後と停止直前の衝動を緩和するために、以下の条件を設定した。

- (1) ブレーキ開始から 1.0s 間はフィードバックを行わない（開ループ型を含め共通の動作となる）。
- (2) 従来型では、上記(1)を経過後、停止まで、制御器に与える目標値を設定減速度の一定値とする。
- (3) 提案型では、上記(1)を経過後、速度 3km/h に減速するまで、3.1 節に示した手順で目標値を逐次更新し、以降は従来型と同じ一定値に固定する。

このほか、ブレーキ中の外乱として、速度 20km/h を下回ったときに Tc 車、Mc 車それぞれの進行方向前方から第2軸のみ BC 圧力を全排気してブレーキ力を意図的に低下させる条件を設定した（「ブレーキ低下条件」とする）。ブレーキ低下条件では、理論的に列車としてのブレーキ力が 25% 低下する。このとき、適用した制御により想定される応答の違いを図 8 に示す。開ループ型ではブレーキノッチを再選択しない限り減速度が低下したまま推移する。従来型では、制御ブレーキノッチが調整される過渡応答時間経過後に減速度が目標値に整定されても、その目標値は減速度が低下する以前と同じである。これに対し提案型では、減速度低下と制御の過渡応答時間によるブレーキ距離の延伸を補償するために、それまでより高い目標値を設定して追従制御を行う。

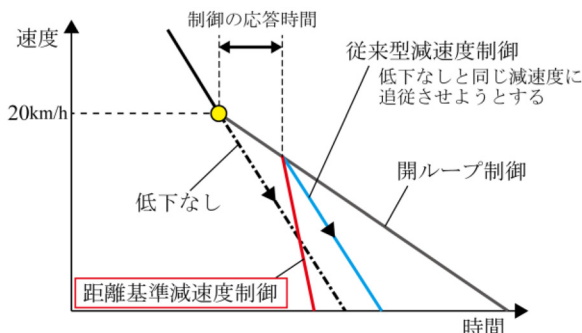


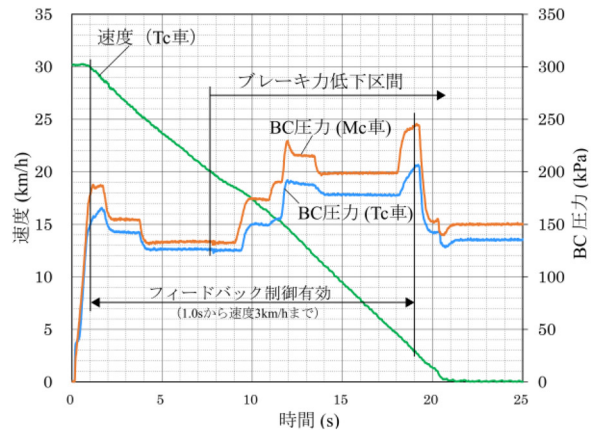
図8 ブレーキ低下条件に対する応答のイメージ

#### 4.3 試験結果

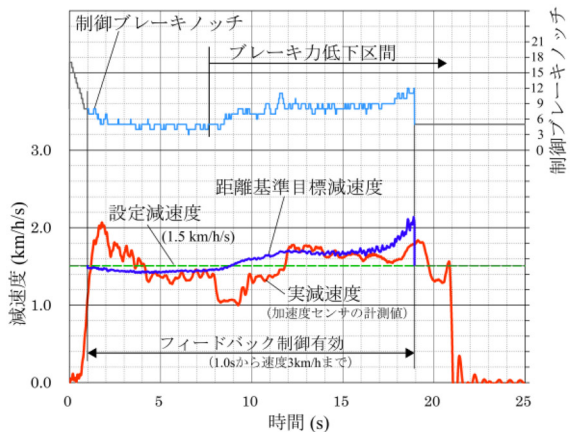
設定減速度 1.5km/h/s、ブレーキ低下条件での提案型の減速状態の例を図9に示す。なお、本図の実減速度は試験列車の車上に設置した加速度センサの計測値である。

ブレーキ開始直後に実減速度が目標値をオーバーシュートしたため、その後の目標値は設定減速度より小さくなっている。そして速度 20km/h からブレーキ低下条件により実減速度が低下したため、設定減速度より大きい目標値に実減速度を追従させ、ブレーキ距離の延伸を補償している。このときのブレーキ初速度の実測値は 30.17km/h で、この初速度から空走時間 1.0s、減速度 1.5km/h/s とした目標ブレーキ距離が 91.83m であるのに対し、速度の時間積分により算出した実測値は 91.82m であった（本報では、ブレーキ距離の精度を優先して設定減速度より小さい目標値を許容したが、実際に目標ブレーキ距離より短いブレーキ距離を許容する場合には、安全面から減速度の目標値の下限を設定減速度とする）。

ブレーキ初速度ごとのブレーキ距離の実測値を図10に示す。図中の「目標ブレーキ距離」は、それぞれの初速度から空走時間 1.0s、減速度 1.5km/h/s で停止したと



(a) 速度と BC 圧力



(b) 減速度と制御ブレーキノッチ

図9 距離基準減速度制御による減速状態の例  
(ブレーキ開始トリガ受信時を 0s とする)

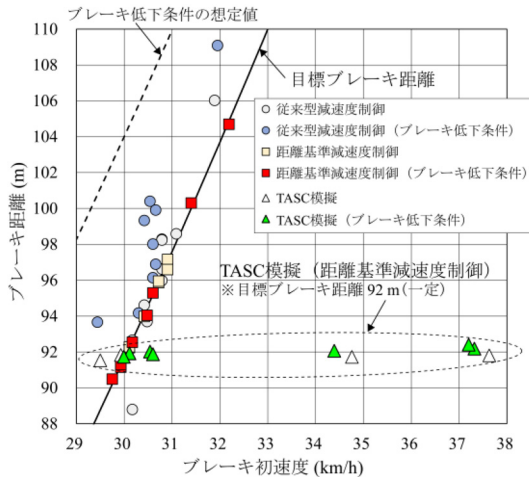


図 10 ブレーキ初速度とブレーキ距離

きの理論値である。「ブレーキ低下条件の想定値」は、速度 20km/h 以下の減速度を 1.125km/h/s (1.5km/h/s の 25% 減) として算出した理論値である。提案型では、ブレーキ低下条件でも実測値が目標ブレーキ距離にほぼ一致し、TASC を模擬した条件では固定値の目標ブレーキ距離にほぼ一致した。

目標ブレーキ距離と実測値の誤差を制御方式別に図 11 に示す。なお、ここでは誤差が正の値のとき、目標ブレーキ距離を過走したことを意味する。

開ループ型では一定値である BC 圧力は一般的に、安全上の余裕を見込んで目標ブレーキ距離より手前に停止できるよう設定される。本報における結果では、ブレーキ低下条件でも目標ブレーキ距離より手前に停止したが、低下なし条件と比較すると 8.40m (平均値) 延伸した。

従来型では、開ループ型に比べて実測値が目標ブレーキ距離に近づき、ブレーキ低下条件における延伸量も 3.24m (平均値) に低減した。しかし従来型は、ブレーキ距離の誤差を制御に反映できる構造ではないため、ブレーキ距離の精度をさらに向上するには、制御器のゲイン調整などにより、実減速度を目標値に追従させる性能を高める必要がある。

これに対し提案型では、制御器の設定は従来型と共通であるにもかかわらず、減速度の目標値を逐次更新することでブレーキ距離の精度を向上し、ブレーキ低下条件の延伸量を 0.16m (平均値) に抑制できた。

## 5. まとめ

本研究では、鉄道車両のブレーキ距離の安定化を目的に、開ループ構造である現状のブレーキシステムに列車の減速度をフィードバックして一定の目標値に追従させる「減速度制御」をさらに改良し、ブレーキ距離に基づいて減速度の目標値を逐次更新する機能を追加した「距

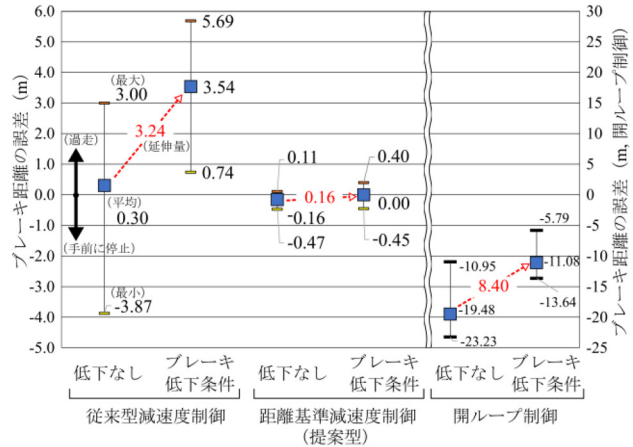


図 11 目標ブレーキ距離と実測値の誤差

離基準減速度制御」を提案した。

そして、提案手法を実車に適用して走行試験を行った結果、意図的にブレーキ力を低下させる条件においても高いブレーキ距離の精度を示した。

なお、提案手法では、フィードバックした列車の速度を微分した減速度に加え、積分したブレーキ距離を制御に利用している。そのため、もとなる速度の精度が制御性能に大きく影響すると推定される。

本報では、列車内の特定の 1 車軸の速度発電機の出力を回転速度としてフィードバックした。車軸の回転速度は、車輪径の違いや滑走により列車の真の速度 (対地速度) との間に誤差を生じる可能性がある。また、速度発電機はその構造上、出力である電圧が低速域で低下する性質がある。

今後は、複数の車軸から取得した回転速度から代表値を選択して冗長性を確保する手法、回転速度によらず対地速度を取得できるセンサと組み合わせる手法などを試行して、フィードバック量である速度の精度が制御性能に及ぼす影響を把握するとともに制御の安定化を図る。また、乗り心地を考慮した衝動の小さい制御パラメータの選定など、実用に向けた検討も進めていく。

## 文 献

- 1) 南京政信：空気ブレーキによる車両減速度制御に関する研究，鉄道総研報告，Vol.17, No.4, pp.35-38, 2003
- 2) 南京政信，中澤伸一，野中俊昭，吉川広：減速度フィードバック機能を備えたブレーキシステムの開発，鉄道総研報告，Vol.23, No.4, pp.41-46, 2009
- 3) 安藤裕隆，田中光彦，成田武：あおなみ線 1000 形車両 TASC 装置 - TASC・ホームドア制御装置 -，鉄道サイバネ・シンポジウム論文集，Vol.42, 論文番号 519, 2005